

锁模激光照射下 InGaAs p-i-n 管的负电压 响应机理

胡伟, 孙晓泉*, 豆贤安

(电子工程学院 脉冲功率与激光技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230037)

摘要:在考察 InGaAs p-i-n 管对锁模激光响应的实验中,发现其响应电压在经历一个快速的上升沿和缓慢的拖尾以后有一个明显的负电压.在二极管的线性响应阶段,负电压与正电压的峰值之比大约在 0.18 左右,且不随激光脉冲能量的增大而改变;在二极管的非线性响应阶段,随着光脉冲能量的增大,负电压逐渐变小最终消失.通过对 p-i-n 管的等效电路模型的建立以及对 RLC 振荡电路方程的求解,认为负电压的产生是由于二极管表现出了可观的电感特性,而负电压的消失是由于二极管的结电容随着光脉冲能量增大而增大的结果.该研究结果对 InGaAs p-i-n 管的设计和制造具有一定的理论指导作用.

关键词:锁模激光;负电压;等效电路;电感;结电容

中图分类号:TN215 **文献标识码:**A

Analysis of the negative voltage-response in the InGaAs p-i-n photodiode under mode-locked laser illumination

HU Wei, SUN Xiao-Quan*, DOU Xian-An

(State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei 230037, China)

Abstract: An interesting phenomenon of transient photo-voltage in the InGaAs p-i-n photo-detector induced by pico-second mode-locked lasers illumination was found. The response voltage presents an obvious negative valley after a rapid rising and a slow relaxation trailing. The amplitude of the negative and positive peak voltage increases with the fixed ratio about 20% with the linear characteristic of the photodiode, then the ratio decreases until the negative valley disappears with the pulse energy increasing with the nonlinear characteristic of the photodiode. By establishing the p-i-n equivalent circuit model and solving the RLC oscillation equation, the appearance and disappearance of the phenomenon can be explained by the non-negligible inductance and the increasing junction capacitance.

Key words: mode-locked lasers, negative voltage, equivalent circuit, inductance, junction capacitance

PACS: 07.57.Kp

引言

InGaAs 材料具有直接带隙,高电子迁移率以及可与 InP 晶格匹配生长等优点,由它制作的光电二极管量子效率高、灵敏度高、结构简单、重量轻、使用方便,在光波段通信领域已得到了广泛地运用^[1,2].为了设计出性能更加优越的 InGaAs 光电二极管,许多学者进行了大量的数值计算^[3,4]和实验^[5,6],分别在不同的激光脉宽和脉冲能量辐照情况下分析其响

应特性和工作机理.大量研究表明:当激光脉冲辐照在光电二极管上时,二极管内部会迅速产生大量的光生空穴电子对,同时由于在内建电场作用下漂移以及载流子本身浓度差导致的扩散,空穴电子对分离并通过金属电极输出信号.所以对光电二极管光电转化机理的深入理解有利于光电探测器的设计和优化.

由于光电探测器的制备材料,结构,制备方法以及加工条件的差异,实际生产出的光电二极管的光

收稿日期:2013-12-09,修回日期:2014-09-10

基金项目:重点实验室基金项目(13J1003)

Foundation items: Supported by The Key Laboratory Foundation(13J1003)

作者简介(Biography):胡伟(1986-),男,安徽全椒人.博士,主要研究领域为光电信息技术, E-mail: double8844@163.com

* 通讯作者(Corresponding author); E-mail: sunxq@ustc.edu

Received date: 2013-12-09, revised date: 2014-09-10

伏效应曲线虽然在趋势上大体满足理论计算结果,但还存在一些特殊的光伏效应,其中负电压效应就是其中一种表现形式.目前的负电压效应主要出现在 HgCdTe^[8]、InGaAs^[2]、GaAs^[7] 这一类探测器中. HgCdTe 探测器的负电压出现的时间在正常光伏响应电压曲线之前,已有学者利用皮秒激光对 HgCdTe 探测器辐照情况下的负电压效应作了研究^[8],由于肖特基接触响应速度快,同时其电场又与二极管内建电场相反,所以会在 HgCdTe 正常响应电压之前出现负电压. InGaAs p-i-n 管的负电压响应也出现在相关的文献资料中,即响应电压在经历一个快速的上升沿和缓慢的拖尾以后有一个明显的负电压^[2,7],虽然文献[2]通过改变 InGaAs 管的直径和结构,负电压现象会消失和产生,但是类似的相关文献的研究重点是二极管的响应脉宽和峰值电压与激光脉冲能量的关系及内部载流子的运动机理^[5,6],对负电压的内在产生机理却鲜有相关的解释和分析.因此,对于该现象的研究和探讨可以更好地完善 InGaAs 二极管光电响应机理的理论研究.

基于以上背景,通过建立 InGaAs p-i-n 管的等效电路模型并且求解其 RLC 振荡方程,认为负电压的产生是由于二极管表现出了可观的电感特性.对于 InGaAs p-i-n 管的光电响应细节研究具有实际意义,利用该模型可以对 InGaAs p-i-n 管的感性特征做出估计,有利于 InGaAs p-i-n 管性能的评估和测试.

1 实验及现象描述

实验中选取的 InGaAs p-i-n 管厚度为 354 μm ,直径为 1 mm,其响应波段为 900 ~ 1 700 nm,选取 InP 作为光敏面是由于其禁带宽度宽,可以使光子的吸收发生在耗尽区内从而提高器件的量子效率和响应速度,如图 1 所示.实验中二极管反偏电压为 5 V,采用的激光波长为 1 064 nm,重频为 18 MHz,脉宽为 20 ps,利用功率计测得脉冲能量为 0.06 nJ,激光通过光敏面 p 型 InP 层(厚度 1 μm ,掺杂浓度 10^{18}cm^{-3})进入 n 型 InGaAs 本征层(厚度 2 μm ,掺杂浓度 10^{15}cm^{-3}),响应电压通过外接电路的 50 Ω 匹配负载输出到 LeCroy 示波器上,图 1 所示,示波器带宽为 1 GHz,采样率为 5 Gs/s.

由图 1 可以很明显的看出,响应电压在在经历一个快速的上升沿和缓慢的拖尾以后有一个明显的负电压,该现象的重复频率也为 18 MHz,且在激光器重新打开后仍然存在.为了进一步考察该负电压

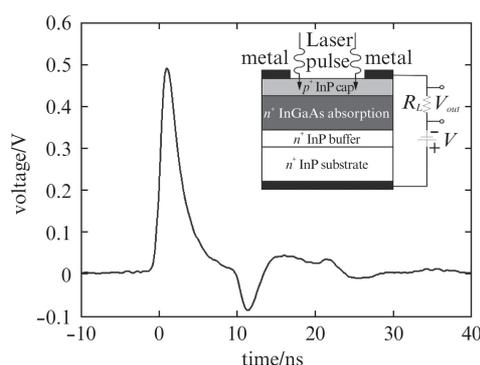


图 1 实验中 InGaAs p-i-n 管光伏响应波形

Fig. 1 The measured response signal in the oscilloscope

的特性,通过调节激光输出接口上的衰减器改变激光脉冲的能量(0.02 nJ、0.12 nJ、0.31 nJ、0.54 nJ、0.71 nJ、0.93 nJ、1.07 nJ、1.9 nJ),可以看出,响应峰值电压是随着脉冲能量的增大而增大的,响应波形的脉宽随着脉冲能量的增大而变宽,如图 2 所示,与此同时响应负电压的幅值却是先随着脉冲能量的增大而增大,然后逐渐减小最后消失,如图 3 所示.

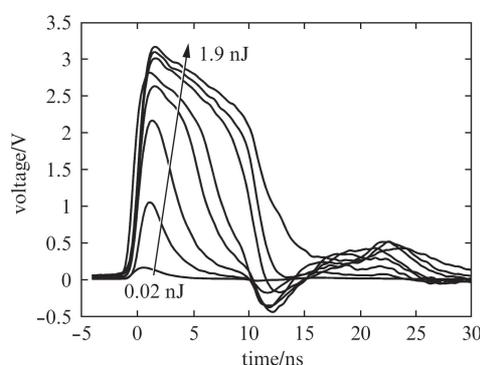


图 2 不同脉冲能量辐照下的响应波形

Fig. 2 The measured signals with different pulse energy

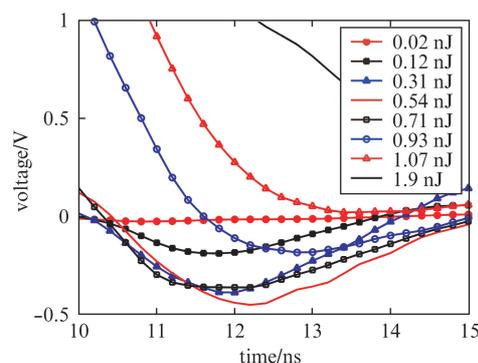


图 3 不同脉冲能量辐照下的负电压

Fig. 3 The negative voltage with different pulse energy

正负电压的幅值关系随着脉冲能量的变化曲线如图 4 所示. 对照二极管峰值响应电压与脉冲能量的变化曲线可以看出, 当脉冲能量小于 0.54 nJ 时, 二极管处于线性工作模式, 此时峰值响应电压随着脉冲能量呈线性增长关系, 而且正负响应电压的幅值比大约在 0.18 左右维持不变, 也间接反映出了如图 3 所示的负电压也随着脉冲能量呈线性增长关系; 而当脉冲能量大于 0.54 nJ 时, 二极管进入非线性工作模式, 峰值响应电压值趋于饱和, 负电压逐渐减小, 所以此时正负响应电压的幅值比随着脉冲能量增大而减小.

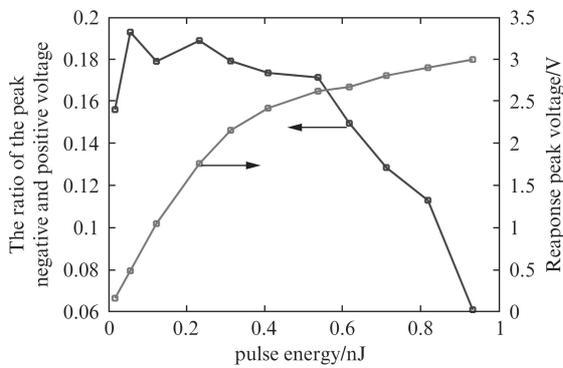


图 4 响应峰值电压与负正电压峰值比

Fig. 4 The peak voltage and the ratio of the negative to the positive voltage

2 分析与计算

对于负电压产生的机理, 首先让人觉得可能的是正如文献[8]所说, 由于金属与半导体肖特基接触的电场与二极管内建电场相反, 易于出现负电压. 然而肖特基相对于二极管来说响应速度快, 负电压应该出现在正常响应电压之前^[9], 这不符合实验中的现象. 所以 InGaAs p-i-n 管的负电压效应不是由于肖特基所致.

通过观察 InGaAs p-i-n 管的响应电压波形, 可以看出是一个类似于正负交替振荡的波形, 所以本文采用二极管的等效电路模型^[10] (如图 5) 来分析计算:

如图 5 所示, R_e 、 C_e 、 L_e 为 InGaAs p-i-n 管的等效电阻、电容和电感的值. 等效电容主要包括势垒电容(介质突变引起)和扩散电容(载流子扩散引起); 等效电感可能是由于封装中器件管座使用的 SMA 接头的内导体与 p 电极的连接导致寄生电感的产生以及光生载流子注入后的漂移和扩散的过程相互作用, 从而引起基区电导调制, 使得 p-n 结的交流导纳

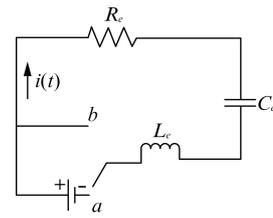


图 5 p-i-n 管的等效电路模型

Fig. 5 The equivalent circuit model of the p-i-n photodiode

的容性分量减小转变为感抗, 表现出可观的电感特性^[11]; 当开关接在 a 档, 电路接通电源, 电路处于充电状态, 类似于激光脉冲在二极管光敏面上注入了大量的光生空穴电子对; 当开关接在 b 档, 电路处于放电状态, 类似于二极管内的光生空穴电子对在电场漂移及自身扩散的作用下分离复合形成光电流; 该电路模型的弛豫过程中的电容两端的瞬时电压 $u_{C_e}(t)$ 和电流 $i(t)$ 的振荡方程为:

$$\begin{cases} \frac{d^2 u_{C_e}(t)}{dt^2} + \frac{R_e}{L_e} \frac{du_{C_e}(t)}{dt} + \frac{1}{L_e C_e} u_{C_e}(t) = 0 \\ i(t) = C_e \frac{du_{C_e}(t)}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

对于该方程的求解, 文献[12]在不考虑电感的情况下得出的拟合曲线公式满足了光电响应电压具有快速的上升沿和缓慢的弛豫过程这一特征, 显然这一情况没有完全满足本文实验中的 InGaAs p-i-n 管的响应特征. 在等效电感不可忽略的情况下, 即

$L_e > \frac{R_e^2 C_e}{4}$ 时, 该方程的解为:

$$i(t) = -\alpha e^{-\alpha t} [K_1 \sin \omega t + K_2 \cos \omega t] + \omega e^{-\alpha t} [K_1 \cos \omega t - K_2 \sin \omega t] \quad (2)$$

α 和 ω 为式(1)特征值 $\lambda_{1,2}$ 的实部和虚部; $\lambda_{1,2} = -\frac{R_e}{2L_e} \pm \sqrt{\left(\frac{R_e}{2L_e}\right)^2 - \frac{1}{L_e C_e}}$. K_1 和 K_2 在响应光电流在峰值时刻 $t_0 = 0$ 满足 $\left. \frac{di(t)}{dt} \right|_{t=t_0} = 0$ 且 $i(t) \Big|_{t=t_0} = i_{\max}$.

为了验证模型的正确性, 根据文献[10][11]中对在光照下 InGaAs 管内等效电参数的计算分析, 选取本文中器件的等效电路参数为 $C_e = 10$ fF, $R_e = 10^3 \Omega$, $L_e = 10 \mu\text{H}$, 可得到光电流在负载电阻上弛豫阶段反映出的归一化电压拟合曲线, 该曲线与实验曲线的对比如图 6 所示.

由于实际中二极管的光电响应机理比较复杂, 而本文的等效电路近似方法没有考虑复杂的机理, 所以两种曲线有一定的差别. 但是可以看出该拟合

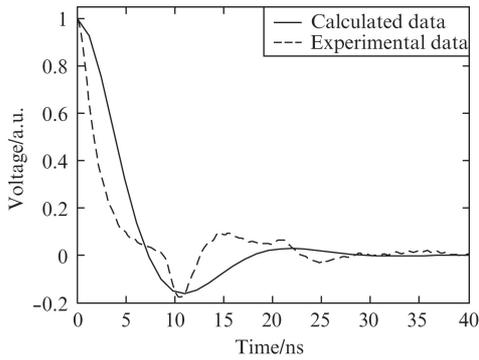


图 6 计算结果与实验结果对比图

Fig. 6 The comparison of the calculated and experimental data

曲线与实验曲线在波形弛豫阶段的变化趋势是比较吻合的,存在缓慢的拖尾和负电压,其与正峰值电压的比值也约为 0.18。所以,对于负电压现象的分析,从电路分析的角度可以得出正是由于二极管表现出的不可忽略的感性特征才使得负电压响应的出现。

对于负电压现象随着光照强度的增加而逐渐消失这一现象的解释,本文利用了 medici 软件计算出 InGaAs p-i-n 管在不同脉冲能量照射下的响应特性。该软件主要是依据 Poisson 方程和电流连续方程分析二极管的光电特性,其表达形式为:

$$\nabla \cdot \varepsilon_r \varepsilon_0 \nabla \varphi = -q(p - n + N_D^+ - N_A^-) - \rho_s \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q} \nabla \cdot J_n - (U_n - G_n) \\ \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{1}{q} \nabla \cdot J_p - (U_p - G_p) \\ J_n = q \mu_n n E_n + q D_n \nabla n \\ J_p = -q \mu_p p E_n - q D_p \nabla p \end{cases} \quad (4)$$

$G_{n,p}$ 为光生电子和空穴的生成速率,计算中采用单光子生成模式,即一个光子生成一个空穴电子对; $U_{n,p}$ 为光生电子空穴的瞬时复合率。 J_n 和 J_p 分别为电子空穴的漂移和扩散的电流密度之和。 D_n 和 D_p 分别为电子和空穴的扩散系数; μ_n 和 μ_p 分别为电子和空穴的漂移系数。

图 7 为计算出 InGaAs p-i-n 管在不同脉冲能量照射下的峰值响应电压和等效电容参数。可以看出,在二极管的线性响应阶段,此时光照强度较低,二极管耗尽区的内建电场有利于载流子的高速漂移,此时峰值响应电压与脉冲能量呈线性增长关系,根据公式 $C = \frac{Q}{V}$,此时等效电容几乎保持不变,维持在 10 fF 量级,所以随着激光能量的变大正负峰值电压的比值不变;而在二极管非线性响应阶段,利用依据

Poisson 方程和电流连续方程计算出二极管内部的场强和空穴载流子的浓度分布,如图 8 和图 9 所示。随着脉冲能量的增大,二极管内部电场下降,管内大量的光生载流子由于来不及快速地漂移扩散而堆积在耗尽区,空穴载流子浓度的激增近 10 个数量级,产生了空间电荷屏蔽效应,峰值响应电压此时趋于饱和值,而二极管内的电荷与光子仍呈单光子吸收的线性增长关系,所以此时二极管的等效电容值呈线性增大趋势。

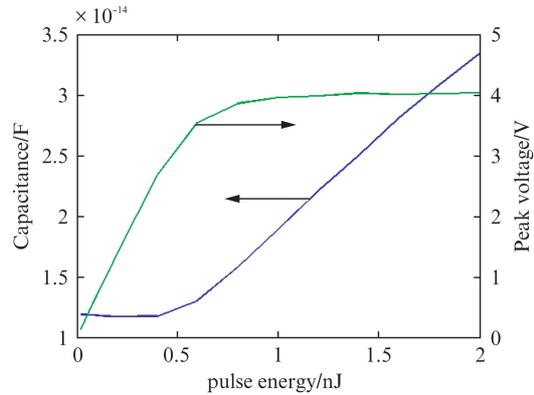


图 7 不同脉冲能量辐照下的峰值电压和等效电容

Fig. 7 The relation between the capacitance and the pulse energy

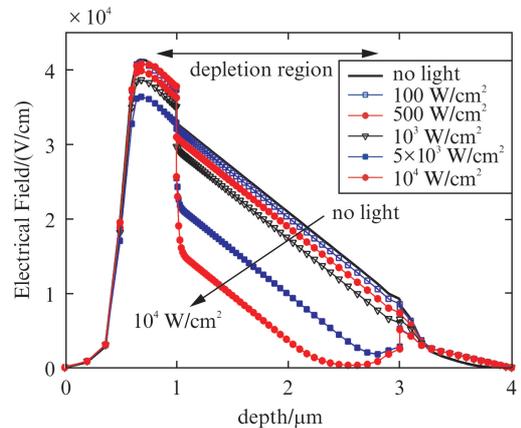


图 8 不同光照下内部电场分布

Fig. 8 Internal electrical field distribution with different optical injection

图 10 是利用本文的等效电路模型计算出的不同等效电容值的情况下响应电压拟合曲线,当二极管线性工作阶段,此时 $C_e = 10$ fF 不变,所以二极管光伏响应的正负峰值电压的比值在 0.18 左右,这与实验现象是吻合的;随着二极管进入非线性工作模式,等效电容逐渐增大,选取 $C_e = 12$ fF、16 fF 以及 32 fF 计算可以看到,负电压的幅值随着等效电容的

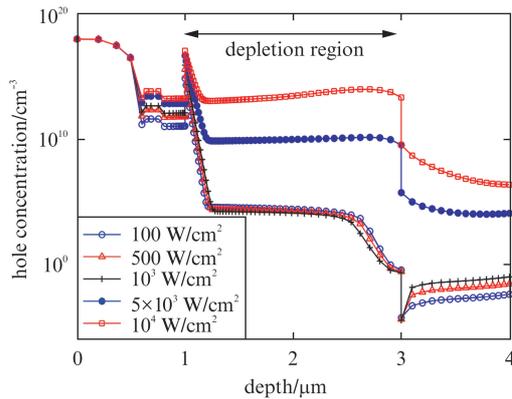


图9 不同光照下内部空穴浓度分布
Fig. 9 Holes distribution in the photodiode with different optical injection

变大而减小,最终消失,同时由于如图9所示二极管内载流子的激增,其弛豫时间变长,导致响应脉宽变宽,也符合实验中观察到的现象.所以可以推断,InGaAs p-i-n管光伏响应负电压的消失是由于强光照下二极管等效电容增大导致.

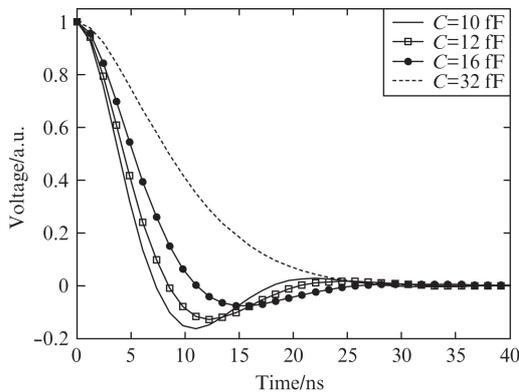


图10 不同等效电容下的响应波形
Fig. 10 The calculation of the response voltage with different capacitance

3 结论

针对实验中观察到的InGaAs p-i-n管光电响应的负电压现象,采用等效RLC电路建立模型,通过求解二阶RLC振荡方程得出负电压的产生是由于二极管感性特征的存在这一结论,同时负电压幅值特性的变化是与二极管电容相关联的.利用该方法,

可以将InGaAs p-i-n管的光电响应特性与等效电路元件参数联系起来,对二极管的设计和分析具有一定的理论支持.

References

- [1] Zhang W, Li T, Lours M, *et al.* Amplitude to phase conversion of InGaAs pin photo-diodes for femtosecond lasers microwave signal generation [J]. *Applied physics B*, 2012, **106**: 301 - 308.
- [2] Taylor J, Datta S, Hati A, *et al.* Characterization of power to phase conversion in high-speed p-i-n photodiodes [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2011, **3**: 140 - 151.
- [3] Larid J S, Onoda S, Hirao T, *et al.* Simulation of impulse response degradation from irradiation induced trapping and recombination regions in an InGaAs on InP photodetector [J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, **104**: 084511.
- [4] Larid J S, Hirao T, Onoda S, *et al.* High-injection carrier dynamics generated by MeV heavy ions impacting high-speed photodetectors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98**: 013530.
- [5] GUO Jian-Chuan, ZUO Yu-Hua, ZHANG Yun, *et al.* Theoretical analysis and experimental study of the space-charge-screening effect in uni-traveling-carrier photodiode [J]. *Acta Physica Sinica* (郭剑川,左玉华,张云,等.单行载流子光电探测器中空间电荷屏蔽效应理论分析和实验研究. *物理学报*), 2010, **59**(7): 4524 - 4529.
- [6] ZHANG Ling-Zi, ZUO Yu-Hua, CAO Quan, *et al.* High-speed and high-power uni-traveling-carrier photodetector [J]. *Acta Physica Sinica* (张岭梓,左玉华,曹权,等.单载流子光电探测器的高速及高饱和功率的研究. *物理学报*), 2012, **61**(13): 138501.
- [7] Lenth W, Chu A, Mahoney L J, *et al.* Planar GaAs pin photodiode with picosecond time response [J]. *Applied Physics Letters*, 1985, **46**(2): 191 - 193.
- [8] Cui H Y, Zeng J D, Tang N Y, *et al.* Study of Schottky contact in HgCdTe infrared photovoltaic detectors [J]. *Opt Quant Electron*, 2013, **45**: 635 - 640.
- [9] CUI Hao-Yang, LI Zhi-Feng, MA Fan-Jun, *et al.* Negative photovoltaic-response in HgCdTe infrared photovoltaic detectors irradiated with picosecond pulsed laser [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (崔昊杨,李志锋,马法军,等.皮秒脉冲激光照射下碲镉汞光伏红外探测器的负光伏响应新现象. *红外与毫米波学报*), 2009, **28**(3): 161 - 164.
- [10] Sergei A M, Alexander L C. P-I-N photodiodes for optical control of microwave circuit [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum electronics*, 2004, **10**(4): 679 - 685.
- [11] 李智. 晶体二极管正向大注入下的电感效应[J]. *成都电讯工程学院学报*. 1963, **3**: 41 - 51.
- [12] Kenyoy C N, Ryba G N, Lewis N S. Analysis of time-resolved photocurrent transients at semiconductor/liquid interfaces [J]. *J. Phys. Chem*, 1993, **97**(49): 12928 - 12936.